

克尔效应对高斯光束聚焦特性的影响*

马再如¹ 冯国英¹ 陈建国¹ 朱启华² 韩敬华¹ 高耀辉¹ 应 婷¹

(1 四川大学 电子信息学院, 成都 610642)

(2 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 612900)

摘 要 利用菲涅尔—基尔霍夫衍射积分公式, 研究薄片近似情况下的 Kerr 效应带来的波前畸变对高斯光束聚焦特性的影响. 在相位延迟为 $-2 \sim 2$ rad 的范围内进行的模拟计算表明: 正 Kerr 效应能提高高斯光束的聚焦强度、增大相对焦移量、提高聚焦光束的焦平面桶中功率和降低几何焦平面的峰值光强; 而负 Kerr 效应, 则会降低聚焦强度、增大相对焦移量、降低聚焦光束的焦平面桶中功率和几何焦平面的峰值光强. 可以通过增大光束菲涅尔数来抑制 Kerr 效应对聚焦特性的影响.

关键词 高斯光束; 克尔效应; 聚焦特性

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

0 引言

强激光在克尔介质中传播时会出现自聚焦、自散焦和自相位调制等非线性现象, 这些非线性效应是由介质的折射率随光强的变化引起的. 在强激光入射的情况下, 介质折射率的变化 Δn 为入射光强 I 与非线性折射系数 γ 的乘积. 非线性折射系数分正、负两种情况, 对 $\gamma > 0$ 的介质, 若光束中心场强比边沿部分的场强高, 则光束通过该介质后, 其中心相位会落后于边沿的相位, 这样传播的光束将汇聚; 而对 $\gamma < 0$ 的介质, 同样空间分布的光束则有中心相位超前于边沿相位, 这样传播的光束将发散. 本文称前一种情况为正克尔效应(或自聚焦效应), 后一种情况为负克尔效应(或自散焦效应). 它们对激光的传输有很重要的影响, 是强激光自聚焦^[1]和“热像”^[2]产生的重要原因.

克尔效应对光束传输特性的影响受到了人们的广泛关注^[3~5], 文献[3]研究了环形光束在非线性介质中的自聚焦效应; 文献[4]分析了克尔效应对环形斑光束半径的偏移影响; 文献[5]研究了高斯光束经过非线性介质后, 受到空间自相位调制光束的远场衍射特性. 克尔效应对高斯光束聚焦特性有何影响则关注不多. 本文研究了这种与其自身光强有关的相位调制作用对高斯光束聚焦特性的影响. 在薄片近似的基础上, 将正的和负的克尔效应统一起来, 利用菲涅尔—基尔霍夫衍射积分公式, 对高斯光束的聚焦强度、焦移和光束远场的场分布等聚焦特性进行了分析.

1 物理基础

假设高斯光束束腰在非线性介质的入射面 $z = 0$ 处, 场分布为

$$E(x, 0) = \sqrt{I_0} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{w_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中 w_0 为光束束宽(光强峰值 $1/e$ 处的半宽); I_0 是输入光束的峰值光强. 显然, 由(1)式可以得到光强的横向空间分布, $I(x, 0) = n\epsilon c E(x, 0) E^*(x, 0) / 2$, n 为介质的线性折射率; ϵ 为折射率, c 为光速, 符号 * 表示复共轭.

当该光束通过长度为 l 的克尔介质后, 克尔效应将使高斯光束在横向空间上得到一个附加相位延迟 $\Delta\phi$ 积分^[1]

$$\Delta\phi(x) = k \int_0^l \gamma I(x, 0) dx \approx k\gamma l I(x, 0) = B \frac{I(x, 0)}{I_0} \quad (2)$$

波数 $k = 2\pi/\lambda$, 其中 λ 是光束波长, $I(x, 0)$ 为光束的横向光强分布, $B = k\gamma l I_0$ 是 B 积分, 显然, 它可以表征克尔效应的强弱, 对介质的非线性折射系数 $\gamma > 0$, 克尔效应就是自聚焦效应; $\gamma < 0$, 克尔效应就是自散焦效应. 考虑薄介质近似情况, 则从介质出射的场为

$$E(x, 0) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{w_0} \right)^2 \right] \exp [i\Delta\phi(x)] \quad (3)$$

为简单起见, 假定焦距为 f 的聚焦透镜紧靠介质的后表面, 透镜的作用是为光束提供一个汇聚的球面因子, 则在透镜的后表面的场分布为

$$E_f(x_f, 0) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_f}{w_0} \right)^2 \right] \exp [i\Delta\phi(x)] \cdot \exp \left[-\frac{jkx_f^2}{2f} \right] \quad (4)$$

利用菲涅尔—基尔霍夫公式可以得出该光束在自由空间传输 z 距离后的场分布

$$E(x, z) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} E_f(x_f, 0) \cdot \exp \left[j \frac{k}{2z} (x - x_f)^2 \right] dx_f \quad (5)$$

可得到相应聚焦光束的光强横向空间分布

$$I(x, z) = \epsilon c E(x, z) E^*(x, z) / 2 \quad (6)$$

一般而言, 式(5)和式(6)是没有解析解的, 但可以用数值计算的办法来计算, 以研究克尔效应对高

* 等离子体物理国家重点实验室开放课题(CD200509)资助
Tel: 028-85405373 Email: zairu-sima@163.com
收稿日期: 2005-04-07

斯光束聚焦特性的影响。

2 计算结果及分析

模拟计算的光束束宽 $w=0.5$ cm; 光束的非涅尔数 N 分别取值为 1、2 和 3; 不考虑薄透镜的光阑限制作用。其中 B 积分的取值分别为 -2 、 -1 、 0 、 1 和 2 。显然, B 积分小于 0 对应的是负克尔效应情况; B 积分大于 0 对应的是正克尔效应情况; B 为 0 是高斯光束直接聚焦的情况。

2.1 对焦移的影响

Y. Li 和 Wolf 发现, 聚焦高斯光束在光轴上光强的最大点往往比其几何焦点更靠近透镜, 他们称这种焦点移动的现象为焦移^[10,11]。本文采用 Li—

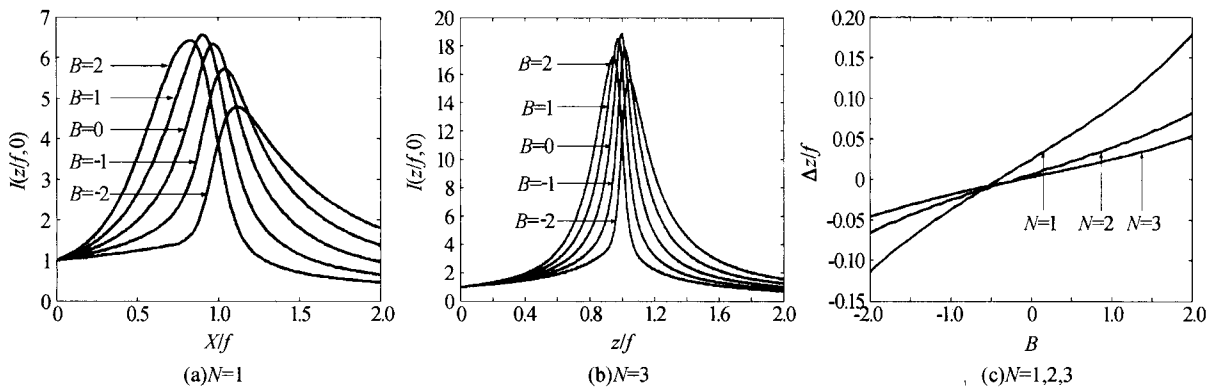


图 1 菲涅尔数 (a) $N=1$, (b) $N=3$ 的条件下, 光轴上强度分布和 (c) 菲涅尔数 N 分别为 1、2 和 3 时的相对焦移

Fig. 1 The intensity distribute on the axis at $N=1$ (a), $N=3$ (b) and the relative focus-shift at $N=1, 2$ and 3 (c)

距变短, 因此使实际的焦平面更加接近透镜, 表现为焦移量的增加; 类似地, 可以解释自散焦介质的焦移量可能为负的现象。

图 1(b) 是在 $N=3$ 的条件下给出的光轴上光强分布, 可以看出不同之处在于, 在 B 积分小于 0 时, 实际焦点可能在其几何焦点之外。

用相对焦移量来说明克尔效应对焦移的影响, 相对焦移量为

$$\Delta z(B)/f = [f - z_{\text{focal}}(B)]/f \quad (7)$$

式中 z_{focal} 为光轴上光强最大点。图 1(c) 给出了菲涅尔数 N 分别为 1、2 和 3 的条件下, B 积分对相对焦移量的影响。从该图可以看出, 相对焦移量随着 B 积分的增大而逐渐增大, 即焦点位置逐渐向透镜靠拢; 在光束的非涅尔数较大时, 相对焦移量的变化范围较小, 更靠近透镜的几何焦平面; 这意味着可以通过增加光束的非涅尔数来减小克尔效应对焦移量的影响。

2.2 对光束质量的影响

对许多实际应用的激光系统, 光束质量的评价参量和方法并不一致, 常用 M^2 因子的大小来表征光束质量的优劣。若对某些只关注光束的聚焦峰值光强或光束远场聚焦能力的激光束而言, 一般用斯特列尔比 (SR) 和焦平面桶中功率 (PIB) 来进行描

Wolf 方法来确定克尔效应对聚焦高斯光束焦移量的影响。

图 1(a) 给出了 $N=1$ 时, 在不同的 B 积分条件下, 光束在光轴上的光强分布。从该图可以看出, 克尔效应对光轴上光强的分布影响有: 1) 是对聚焦光束光轴上峰值光强及其位置的影响表现为: 正克尔效应使其峰值增大, 其位置更靠近透镜面, 即 B 积分越大, 则焦移量更大; 与之相反, 负克尔效应使其峰值降低; 2) 是正克尔效应使光束更快地汇聚, 然后又更快地发散。负克尔效应延迟了光束汇聚, 汇聚后光束发散较慢。

非线性系数为正的克尔效应, 使介质类似于一个正透镜, 增加了聚焦透镜的聚焦能力, 并使它的焦

述, 本文就采用这两个评价参量来表征克尔效应对它们的不同影响。

图 2(a) 在 $N=1$ 的条件下, 给出了光束在不同 B 积分情况下, 光轴上最大光强处即实际焦平面上的光强分布。需要注意的是, 不同的 B 积分, 其位置并不相同。从图中可以看出, 当 $B=1$ 时, 聚焦峰值光强极大, B 积分小于 1 时, 随 B 积分的增大, 其峰值光强随之增强; B 积分大于 1 时, 随 B 积分的增大, 峰值是降低的。

斯特列尔比 (SR) 定义为实际光束轴上的远场峰值光强与具有同样功率、位相均匀的理想光束轴上的峰值光强之比, 它可以较好的反应光束波前畸变对远场光束质量的影响^[12]。在这里用它来说明克尔效应对聚焦光束远场峰值光强的影响。斯特列尔比表示为

$$\text{SR}(B) = I(0, f, B) / I(0, f, 0) \quad (8)$$

式中 $I(0, f, 0)$ 是 B 积分为 0 时透镜焦面光轴上的峰值光强, SR 值越大, 则表示远场质量越好, 光束的波前畸变越小。图 2(b) 给出了 B 积分对聚焦光束的斯特列尔比, 在光束的非涅尔数为 1 时, 最大的 SR 值在 B 为 1 的附近; 而对较大光束非涅尔数, 极大 SR 值出现在 B 积分为 0 的附近。因此, 对某些需要高值峰值光强的光束, 可以选择恰当菲涅尔数以

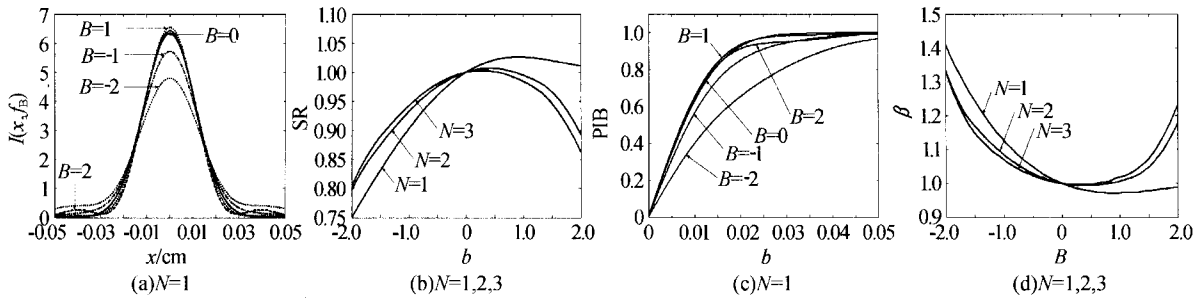


图 2 (a) 焦平面上强度分布; (b) 不同菲涅尔数下的斯特列尔比; (c) 菲涅尔数 $N=1$ 条件下焦平面的桶中功率; (d) 不同菲涅尔数条件下的 β 参量

Fig. 2 The intensity distribute in the focal plane (a) SR at different Fresnel numbers (b) the PIB at focal plane at $N=1$ (c) and the β parameters at different Fresnel numbers (d)

满足条件.

对很多实际工作中的高功率激光, 较为关注其远场的可聚焦能力, 可以用桶中功率 (PIB) 来评价聚焦光束的质量^[13]. 桶中功率定义为在远场给定尺寸的“桶”中围住的激光功率占总功率的百分比, 可表示为

$$PIB = \frac{\int_{-b}^b |E(x, z)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x, z)|^2 dx} \quad (9)$$

式中 $E(z, x)$ 为光束焦面的场分布. b 为桶的宽度. $0 \leq PIB \leq 1$, PIB 越大, 则表示光束质量越好. 也可以用 β 参量表征激光光束质量, 它的定义为

$$\beta = \sqrt{A_m / A_0} \quad (10)$$

式中 A_m 和 A_0 分别为 $PIB=63\%$ 时实际光束和理想光束的面积^[14]. 为考察 B 积分对 β 参量的影响, 这里 A_0 指 B 积分为 0 时面积. β 参量越小, 聚焦能力越强, 光束质量越好.

图 2(c) 给出了光束的非涅尔数为 1 的条件下, 不同 B 积分对实际焦平面上 PIB 曲线分布的影响. 在 $PIB < 0.8$ 的情况下, $B=1$ 时, 桶的宽度 b 最小, 表明此时聚焦能力越强, 从图 2(a) 中也可以直观地得到这样的结论. 可以看出, 一定的 B 积分有利于光束聚焦能力的提高.

图 2(d) 给出了不同的菲涅尔数情况下, B 积分对 β 参量的影响. 从中可以看出, 随着 B 积分的增加, β 参量有一个下降到升高的过程, 说明光束的聚焦能力随 B 积分的增加, 有一个从升高到降低的变化过程. 对较大光束非涅尔数的条件下, β 参量范围较小, 但变化更为剧烈, 即大的菲涅尔数的 β 参量对克尔效应的变化更加敏感. 因此可以通过调整光束的非涅尔数和克尔效应的强弱, 来获得最佳的 β 参量, 即得到高斯光束的最佳聚焦特性.

2.3 对几何焦平面光强分布的影响

激光光束的远场特性是颇受关注的问题之一, 实质上它就是光束的在其聚焦透镜的几何焦平面的光强分布^[10,11], 对式(4)进行傅里叶变换, 取其频谱分布的模的平方, 可得到几何焦平面的光强分布.

图 3(a) 给出了光束的非涅尔数为 1 时, 克尔效

应对几何焦平面光强分布的影响. 与实际焦平面上光强分布相比较 (见图 2(a)), 几何焦平面的光强分布有两个不同之处, 正负克尔效应都将使几何焦平面的光斑峰值强度降低, 光斑半径增加; 当正克尔效应和负克尔效应的强度一致时, 其光强的分布是一致的, 这点在文献[5]中有较好的说明.

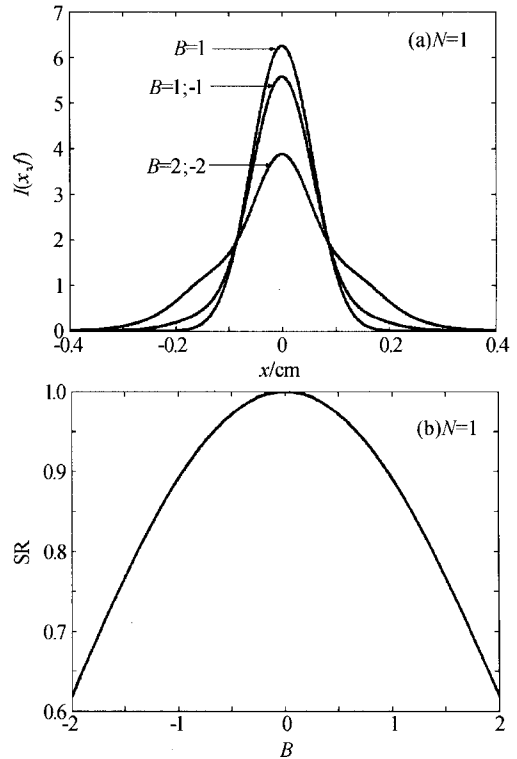


图 3 几何焦平面上的 (a) 强度分布和 (b) 斯特列尔比
Fig. 3 The intensity distribute (a) and the SR on the geometry focal plane (b)

正克尔效应能增大了焦平面的峰值光强. 光强峰值图 3(b) 给出了在光束的非涅尔数 N 为 1 条件下的克尔效应对斯特列尔比的影响: 克尔效应使聚焦光束的远场峰值降低.

3 结论

本文在对非线性折射率的物理特性分析的基础上, 将自聚焦和自散焦效应统一起来进行考虑, 在满足薄介质模型的条件, 使用 PIB、 β 参量和斯特列

尔比等方法,将克尔效应对光束聚焦的焦移、光束质量和光束远场分布的影响进行了较为详尽的分析和讨论.指出可以通过增大光束的非涅尔数来降低克尔效应对高斯光束聚焦特性的影响,以改善光束的聚焦特性.

参考文献

- 1 Simmons W W, Hunt J T, Warren. Light propagation through large laser systems. *IEEE J Quantum Electron*, 1981, **17**(9):1727~1744
- 2 王道,景峰,朱启华,等.位相扰动下“热像”规律研究. *激光技术*, 2003, **27**(6):541~543
Wang X, Jing F, Zhu Q H, et al. *Laser Technology*, 2003, **27**(6):541~543
- 3 苗润才,沈常宇,叶青,等.环形斑光束在非线性克尔介质中的自聚焦效应. *光子学报*, 2003, **32**(2):204~208
Miao R C, Shen C Y, Ye Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):204~208
- 4 苗润才,叶青,沈常宇,等.环形斑光束在非线性克尔介质中环半径的偏移现象. *光子学报*, 2002, **31**(7):882~886
Miao R C, Ye Q, Shen C Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7):882~886
- 5 何坤娜,邓罗根.高斯光束通过非线性介质后的远场衍射图样的研究. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(6):940~944
He K N, Deng L G. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6):940~944
- 6 楚晓亮,张彬.超短脉冲在放大介质中传输特性研究. *光子学报*, 2004, **33**(6):641~644
Chu X L, Zhang B. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):641~644
- 7 Guo Kangxian, Chen Chuanyu. Electron-phonon interaction on the optical Kerr effect in cylindrical quantum wires. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2):180~183
- 8 朱静,胡巍,易煦农,等.片状放大器中片间空气间隔对小尺度自聚焦的影响. *光子学报*, 2006, **35**(3):343~347
Zhu J, Hu W, Yi X N, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3):343~347
- 9 马再如,冯国英,陈建国,等.克尔效应对高斯光束质量 M^2 因子的影响及抑制. *光子学报*, 2006, **35**(4):521~524
Ma Z R, Feng G Y, Chen J G, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4):521~524
- 10 Li Y, Wolf E. Focal shifts in diffracted converging spherical-waves. *Opt Commun*, 1981, **39**(4):211~215
- 11 Li Y, Wolf E. Focal shifts in in focused truncated gaussian beams. *Opt Commun*, 1982, **42**(3):151~156
- 12 Siegman A E. How to (maybe) measure laser beam quality. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, **17**(5):184~199
- 13 Garay A. Continuous wave deuterium fluoride laser beam diagnostic system. *SPIE*, 1998, **888**:17~22
- 14 王云萍,黄坚举,乔光林.高能激光光束质量的评价方法. *电子·激光*, 2001, **12**(10):1029~1033
Wang Y P, Huang J Y, Qiao G L. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2001, **12**(10):1029~1033

Influence of the Kerr Effect on the Focusing Property of the Gaussian Beam

Ma Zairu¹, Feng Guoying¹, Chen Jianguo¹, Zhu Qihua², Han Jinghua¹, Gao Yaohui¹, Ying Ping¹

¹ Department of Opto-electronics, Sichuan University, Chengdu 610064

² Research Center of Fusion CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900

Received date: 2005-04-07

Abstract Based on the Fresnel-Kirchhoff diffraction theory, the focusing property of the Gaussian beam transmitted through the thin Kerr medium is studied. The simulation for the phase-delay ranging from to is made, and the results show that, for medium with positive nonlinear refraction index, the Kerr effects of the beam may improve the focused peak intensity and the PIB on the focal plane, enlarge the relative focal shift and reduce the peak intensity on the geometry focal plane; but for negative index medium, it will reduce the focused peak intensity and its PIB on the focal plane, but other properties of the focusing remain the same as the positive one. And the influence of the Kerr effects on the focusing property can be reduced by enlarging the Fresnel number of the Gaussian beams.

Keywords Gaussian beam; Kerr effect; Focusing property



Ma Zairu was born in 1972. He received his B. S. from Huaibei Coal Industry Normal College in 1996. Now he is in Sichuan University. His interesting field are ultrashort pulse and nonlinear optics.